

УДК 621.375.826

Л.Ф. Головка, М. Рахмані

ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ РЕБЕР ЖОРСТКОСТІ, ЯКІ ПІДВИЩУЮТЬ СТІЙКІСТЬ ТОНКОЛИСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ**Вступ**

Прагнення до економії матеріальних і енергетичних ресурсів, зменшення ваги, розмірів, трудомісткості і собівартості виробів сприяє поширенню використання при їх виготовленні тонколистових металевих матеріалів. Прикладів таких виробів можна навести багато — від кузова легкового автомобіля, корпусу приладу, антени космічного апарата до корпусів відрізних діамантових кругів. Головним фактором, який значно обмежує сферу застосування таких конструкцій, є їх жорсткість. Жорсткість, як відомо — це властивість конструкції або її елементів протистояти зовнішнім навантаженням з точки зору їх деформації, тобто зміни форми і розмірів. При заданих навантаженнях деформації не повинні перевищувати певні значення, які є граничними і встановлюються у відповідності вимог до конструкції. Чим тонше метал, з якого виготовлено виріб, тим менша його жорсткість.

Для підвищення цієї характеристики конструкцій використовуються різні засоби [1, 2]. Насамперед — це конструктивні прийоми, які базуються на зв'язку геометричних параметрів виробу з його жорсткістю. Підвищити жорсткість конструкції можна за допомогою створення в ній замкнутих порожнин, виготовлення ребер жорсткості, окантовок, потовщень тощо. Але всі ці способи мають певні недоліки, основним з яких є збільшення розмірів і маси конструкції. Щоб уникнути цього, конструкції виготовляють із спеціальних композитних матеріалів, армованих високомодульними частинками або волокнами [3]. Такий спосіб дає змогу певною мірою вирішити розглянуту проблему. Однак при цьому різко зростає вартість виробів.

Відомо, що лазерне нагрівання створює в металевих матеріалах локальні зони, структура, твердість і напружений стан яких істотно відрізняється від основи [4]. При цьому розміра-

ми, формою, законом розміщення таких зон по поверхні досить легко керувати, змінюючи траєкторію руху променя та параметри нагрівання. Знаючи закономірності зміни властивостей опромінених зон і характеристик пружних напружень, які виникають у матеріалі реальної конструкції при дії зовнішніх навантажень, можна істотно впливати на жорсткість виробу. По суті, з'являється можливість за допомогою лазерного опромінення створювати в металевих матеріалах металургійні ребра жорсткості.

Постановка задачі

Основною метою даного напрямку досліджень є створення в металевих матеріалах на строго певних ділянках даної конструкції залишкових напружень, які дорівнюють за величиною і протилежні за знаком максимальним пружним напруженням, що виникають на цих ділянках при дії робочих навантажень, зумовлених роботою деталі в складі виробу в процесі експлуатації. Такий спосіб впливу на напружений стан матеріалу конструкції дає можливість залежно від пріоритету підвищити її жорсткість або величину припустимих навантажень, знизити матеріалоемність виробу тощо. Для реалізації цієї ідеї пропонується цілеспрямовано створювати необхідні залишкові напруження в найбільш напружених ділянках виробів шляхом їх локального лазерного нагрівання, в тому числі й із зміною хімічного складу матеріалу в даних зонах.

Керувати величиною, знаком і характером розподілу залишкових напружень можна, змінюючи технологічні параметри лазерної обробки (потужність випромінювання, розміри і форму зони нагрівання, час і кількість термічних впливів) та режими опромінення (імпульсний, безперервний). Крім того, на напружений стан опромінених ділянок впливає топографія розміщення зон нагрівання, хімічний склад та вихідна структура матеріалу виробу. Додаткові можливості в цьому плані надають комбінований вплив — лазерне нагрівання й пластичне деформування, дія ультразвуку тощо.

Окремі результати досліджень були опубліковані нами раніше [5, 6]. Дана стаття є логічним продовженням обраного напрямку досліджень і відображає деякі результати, що стосуються можливостей керування напруженим станом тонких дисків через створення температурних полів необхідної конфігурації.

Математичне моделювання напружено-деформованого стану диска

Моделювання напружено-деформованого стану сталевго диска при різних умовах навантаження проводилося з використанням програмного забезпечення MSC Nastran. Для цього формувалася тривимірна геометрична модель диска з частиною вала, на якому він закріплений (рис. 1). При проведенні розрахунків покладалося, що тонкий диск, виготовлений із хромистої сталі (1,3 % C, 1 % Cr), товщиною 0,5 мм, діаметром 200 мм, був жорстко посаджений на вал діаметром 30 мм, до якого прикладено крутний момент M .

Модуль пружності E , модуль зрушення G , коефіцієнт Пуассона μ і густина матеріалу ρ бралися як для вуглецевої сталі, а за граничні напруження — напруження, які відповідають межі текучості σ_T сталі при розтягуванні, стисненні та зрушенні.

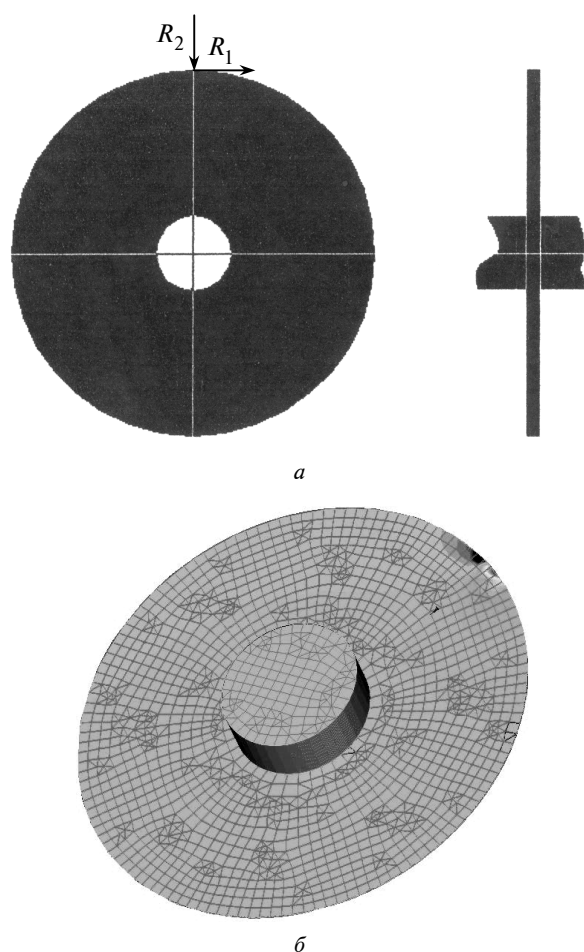


Рис. 1. Схема розрахункової моделі диска (а) і розбивки її на елементи (б)

Для реалізації розрахунку методом скінченних елементів було вибрано розміри елементів досліджуваної області, задано граничні умови та області, до яких вони належать (внутрішній діаметр диска) і умови навантаження.

У процесі обертання диск контактує з оброблюваним матеріалом і на нього діють радіальна R_1 і тангенціальна R_2 реакції. Їх співвідношення може змінюватися в досить широкому діапазоні. Розрахунки проводилися при різних співвідношеннях $R_1:R_2$ (таблиця). Напрямок сил показано на рис. 1, а. Розраховувалися розподіли нормальних, тангенціальних, максимальних тангенціальних напружень і деформацій у різних площинах.

Таблиця. Варіанти співвідношення розрахункових навантажень

Варіант	R_1	R_2	Варіант	R_1	R_2
1	20	10	8	260	220
2	80	50	9	270	320
3	100	110	10	280	420
4	110	130	11	100	420
5	170	140	12	80	200
6	170	170	13	100	250
7	180	210	14	300	100

Вплив умов навантаження на розподіл напружень у диску

Аналіз результатів розрахунків показав, що в корпусі диска при дії зовнішнього навантаження (див. рис. 1) формуються різні за величиною, знаком і конфігурацією розподілу напруження. В області, яка прилягає до точки прикладання навантаження, мають місце нормальні стискальні напруження, у периферійних — розтягальні (рис. 2, а, б). Конфігурація їх розподілу істотно залежить від співвідношення радіальної і тангенціальної складових навантаження. При великій радіальній складовій стискальні напруження зосереджені вздовж радіуса (рис. 2, а). Із збільшенням тангенціальної складової траєкторія розподілу нормальних стискальних напружень вигинається в бік, протилежний напрямку обертання диска (рис. 2, б). Ця закономірність має постійний характер. Напружений стан диска, а отже, і його деформування, при відомих складових навантаження можна прогнозувати.

Задаючись граничними значеннями деформації, можна встановлювати критичні значення

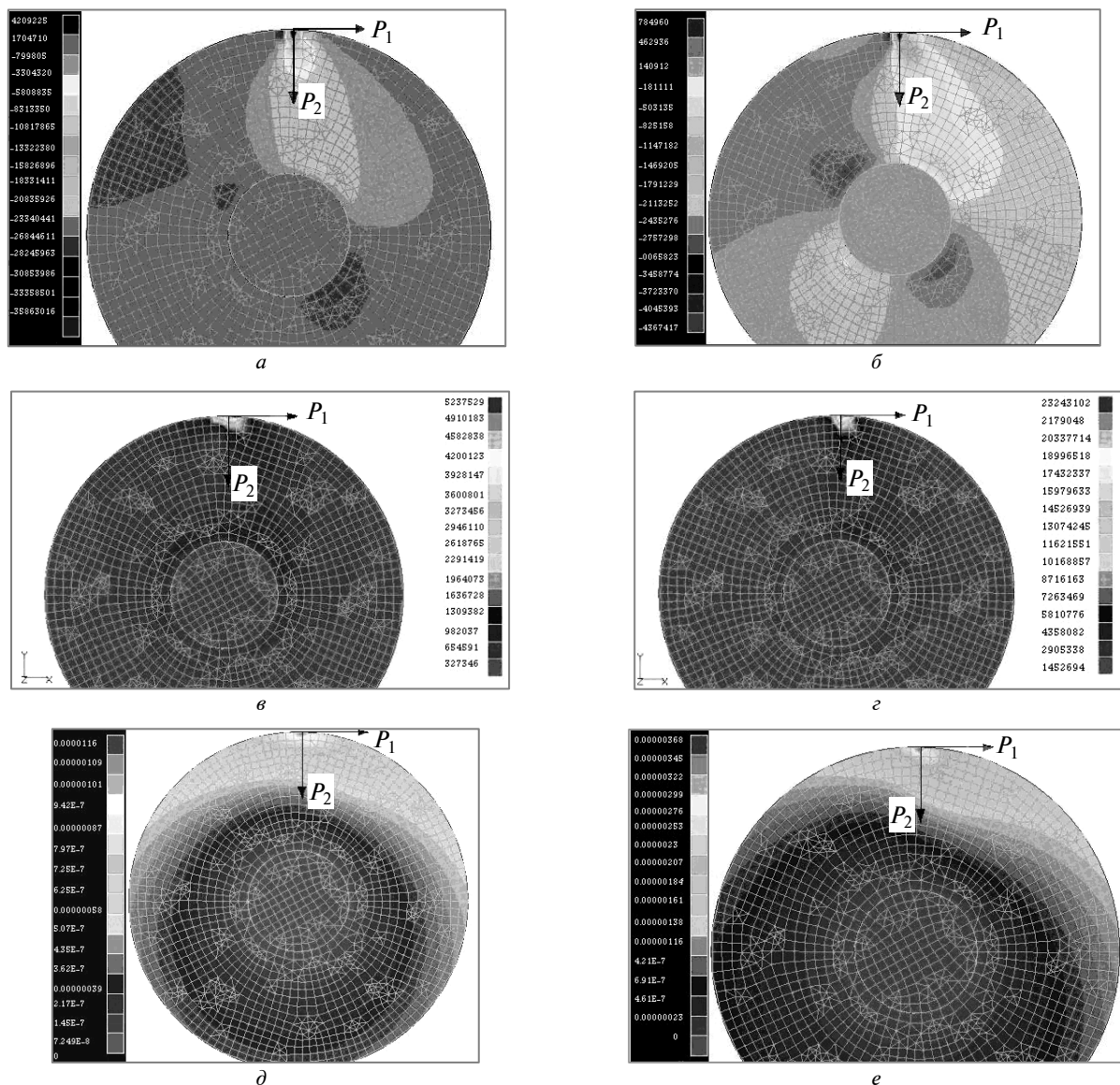


Рис. 2. Розподіл нормальних (а, б), тангенціальних (в, г) напружень і деформацій (д, е) в диску при таких співвідношеннях складових навантаження $R_1:R_2$: 10:50 Н (а, в, д); 20:80 Н (б, г, е)

навантаження. Ці значення визначають жорсткість диска. Збільшити критичні навантаження можна попереднім формуванням у матеріалі диска в областях зосередження робочих стискальних напружень, залишкових напружень протилежного знака. Таке завдання пропонується вирішити застосуванням локального лазерного нагрівання. При лазерному нагріванні в сталі залежно від хімічного складу, вихідного структурного стану і умов опромінення можна сформувати як стискальні, так і розтягальні залишкові напруження. Завдяки локальності процесу можна одержати різний їх розподіл по диску.

Експериментальне устаткування і методики дослідження

Експериментальні дослідження проводилися на лазерному технологічному комплексі на базі газорозрядного CO_2 -лазера “Комета-2” (довжина хвилі випромінювання $\lambda = 10,6$ мкм, потужність випромінювання $P = 1,5$ кВт, модовий склад пучка – TEM_{20} , діаметр вихідного пучка $d = 42$ мм). Випромінювання фокусувалось лінзою, виготовленою з КІ, з фокусною відстанню $F = 300$ мм. Потужність випромінювання безупинно контролювалася за допомогою спеціально розробленого прохідного

вимірника, який працює на відгалуженні частини випромінювання (1 %) від основного пучка. Для оцінки розподілу потужності випромінювання у площині фокусування і визначення фактичного діаметра пучка в площині фокусування було використано методику сканування поперечного перетину променя діафрагмою, а також аналізатор лазерних пучків типу LBA фірми "ALL Gmb".

Досліджувалися вуглецева сталь У10, легovanі сталі 95Х і В2Ф. Зразки завтовшки 1 мм оброблялися лазерним випромінюванням при таких режимах: діаметр плями фокусування – $d_0 = 5$ мм, потужність випромінювання – $P = 1$ кВт, швидкість обробки – $V = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$ м/хв.

Опромінені зразки пластин розрізалися на електроерозійному верстаті дровим електродом у напрямку, перпендикулярному переміщенню лазерного променя (поперек "доріжок" і вздовж них), на дві однакові частини. З однієї із половинок готувався за стандартною методикою металографічний шліф. Вияв мікроструктури зон лазерного нагрівання проводився з використанням 3 %-ного спиртового розчину азотної кислоти.

Вивчення мікроструктури поверхневих шарів, зміцнених лазерним випромінюванням, проводилося на металографічних мікроскопах ММР-2Р і Neorpot 23, вдосконалених завдяки їх оснащення цифровою телекамерою, під'єднаною до комп'ютера. Вимірювання мікротвердості зон лазерного нагрівання здійснювалось на мікротвердометрі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 100 г.

Особливості структурно-фазових перетворень при лазерному нагріванні тонких сталевих дисків

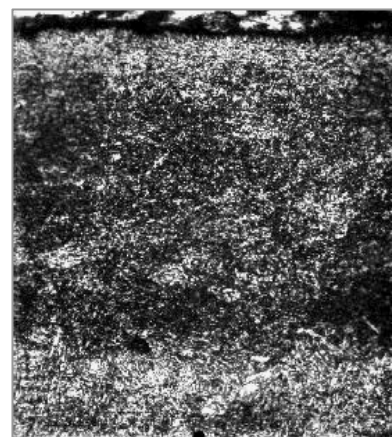
Структура сталі В2Ф у відпаленому стані – це зернистий перліт і залишки карбідної сітки. На рис. 3, а зображено зону термічного впливу, отриману в результаті лазерного опромінення пластини із сталі В2Ф завтовшки 1 мм при потужності випромінювання 1 кВт, діаметрі плями фокусування 4,5 мм та швидкості переміщення зразка 0,5 м/хв. Цю зону було розділено на кілька шарів. У першому шарі з них, де температура перевищувала критичну точку A_{Cm} , повністю розчинилися карбіди. Структура цього шару – мартенсит (рис. 3, б) і високолегований залишковий аустеніт, мікротвердість її –

7000–7500 МПа. У другому шарі температура нагрівання була ближча до оптимальних температур загартування для даної сталі, а швидкість охолодження – достатня для утворення мартенситу. Карбідна сітка була подрібнена, і тому утворилися високодисперсні карбіди. Твердість цього шару становила 7500 МПа. При подальшому віддаленні від поверхні виявилась структура неповного загартування, яка вмішала мартенсит, деяку кількість залишкового аустеніту, невеликі включення карбідів. Твердість шару при цьому була 5500–6000 МПа. Перехідний шар зони термічного впливу в тонкій пластині, на відміну від обробки масивних деталей, мав розмиті границі. Структура цього шару: троостит з ділянками мартенситу.



× 75

а



× 400

б

Рис. 3. Загальний вигляд зони термічного впливу (а) в пластині завтовшки 1 мм із сталі В2Ф і її структура (б) після лазерного опромінювання при $P = 1$ кВт, $d_0 = 4,5$ мм, $V = 0,5$ (а) і $1,0$ м/хв (б)

Як видно з рис. 3, загальна форма зони із зміненою структурою має велику нерівномірність по глибині. Це значить, що й напруження, зумовлені лазерним нагріванням і відповідними структурними перетвореннями, також будуть нерівномірними і призведуть до дефор-

мації диска. В цьому випадку стискальні напруження, зумовлені мартенситними перетвореннями, більші на поверхні диска. Тому диск повинен набути кулеподібної форми опуклістю назустріч променю. Очевидно, що при опроміненні пластини з нержавіючої аустенітної сталі, в якій переважають залишкові розтягальні напруження, вона буде деформуватися у протилежному напрямку.

Щоб уникнути деформації пластини, можна застосувати спосіб, який полягає в тому, що лазерному опроміненню піддаються ділянки корпусу, що знаходяться строго один проти одного на протилежних поверхнях (рис. 4).

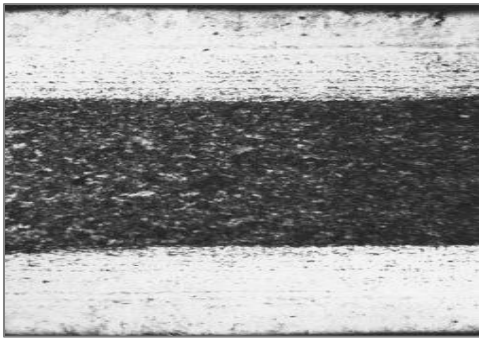


Рис. 4. Тонка пластина із сталі (1 % С), підкріплена з двох боків лазерним випромінюванням ($P = 1$ кВт, $d_0 = 5$ мм, $V = 2$ м/хв)

Щоб уникнути деформації диска внаслідок локальності процесу лазерного нагрівання, його обробку слід проводити в стані, коли він затиснутий між двома матрицями, як це показано на рис. 5. При цьому диск встановлюється в матриці пристрою і затискується другою матрицею з пазами спеціальної форми, через які проводиться лазерне нагрівання. Форма і розміри пазів відповідають конфігурації розподілу максимальних пружних напружень (див. рис. 2, б).

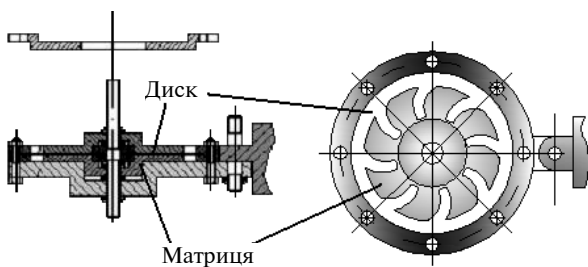


Рис. 5. Пристрій для двобічної лазерної обробки диска, затиснутого між двома матрицями

Після обробки матриці із затисненим диском перевертаються і проводиться лазерна обробка другого боку диска. Тільки після повної обробки диск вивільняється. При цьому забезпечується врівноваження напружень у тілі диска і, таким чином, диск не піддаватиметься деформації.

Але наведений спосіб лазерної обробки дисків має і певні недоліки: це – громіздкість, висока трудомісткість і мала продуктивність. З метою вдосконалення даного способу розглядалась можливість отримання за допомогою лазерного нагрівання в сталевій пластині зони термічного впливу, форма якої істотно відрізнялася б від класичної, характерної для умов опромінювання лазерним пучком з рівномірним розподілом інтенсивності в площині фокусування, зображеної на рис. 3, а і 6, а. Така зона термічного впливу, обмежена визначеними ізотермами, повинна мати однакову ширину по всій товщині пластини, як це показано на рис. 6, б.

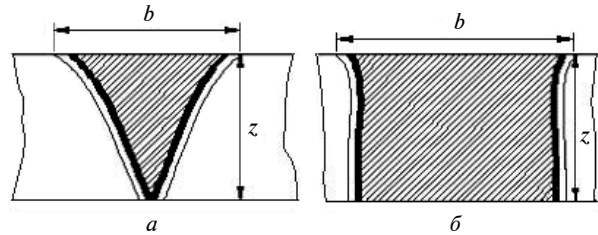


Рис. 6. Реальний (а) і бажаний (б) розподіл ізотерм загартовування сталі по товщині диска

Щоб визначити умови, при яких утворюється відповідна зона, проводилося математичне моделювання теплових процесів, які відбуваються в тонкій пластині при нагріванні потужним лазерним випромінюванням [6].

Математичне моделювання теплового стану тонкої пластини при лазерному нагріванні

Лазерний промінь з інтенсивністю q переміщується по поверхні металевої пластини з розмірами L_x , L_y , L_z у напрямку осі OY із швидкістю V (рис. 7).

Траєкторія переміщення лазерного променя може бути різною (рис. 8, а, б), але при цьому вона має відповідати найбільш характерним розподілам максимальних пружних нормальних напружень, зображених на рис. 2, а, б.

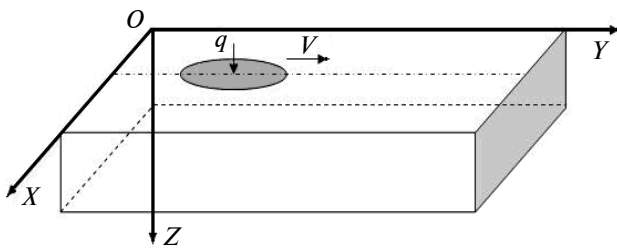


Рис. 7. Розрахункова схема лазерного нагрівання тонкої пластини

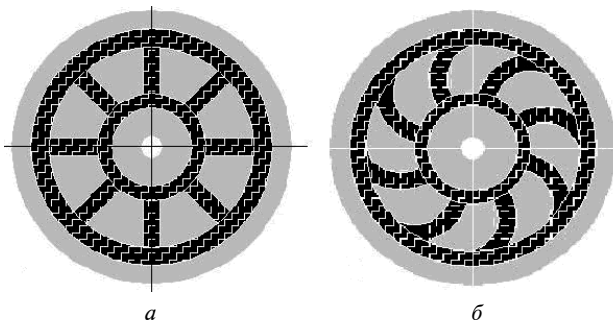


Рис. 8. Варіанти траєкторій переміщення лазерного променя

Як модель процесу лазерного нагрівання використовувалося рівняння теплопровідності

$$c_p \frac{\partial U}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$x \in [0, L_x], y \in [0, L_y], z \in [0, L_z], t \in [0, T_k]$$

з початковими умовами:

$$U(x, y, z, 0) = U_{\text{поч}},$$

граничними умовами:

на поверхні в зоні дії променя:

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, 0, t)}{\partial z} + q(x, y, t) = 0,$$

$$q(x, y, t) = q_{\max}(x', y') e^{-5 \frac{(x-x_u)^2 + (y-y_u)^2}{r^2}},$$

$$x_u = \frac{L_x}{2}, y_u = Vt,$$

поза зоною дії променя:

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, 0, t)}{\partial z} + \alpha[U(x, y, 0, t) - U_c] = 0,$$

на інших поверхнях розрахункової області:

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, L_z, t)}{\partial z} + \alpha[U(x, y, L_z, t) - U_c] = 0,$$

$$\lambda \frac{\partial U(0, y, z, t)}{\partial x} + \alpha[U_c - U(0, y, z, t)] = 0,$$

$$\lambda \frac{\partial U(L_x, y, z, t)}{\partial x} + \alpha[U(L_x, y, z, t) - U_c] = 0,$$

$$\lambda \frac{\partial U(x, 0, z, t)}{\partial y} + \alpha[U_c - U(x, 0, z, t)] = 0,$$

$$\lambda \frac{\partial U(x, L_y, z, t)}{\partial y} + \alpha[U(x, L_y, z, t) - U_c] = 0.$$

Для розв'язання цієї задачі застосовувався метод скінченних різниць з адаптивною сіткою, що змінювалась на кожному часовому

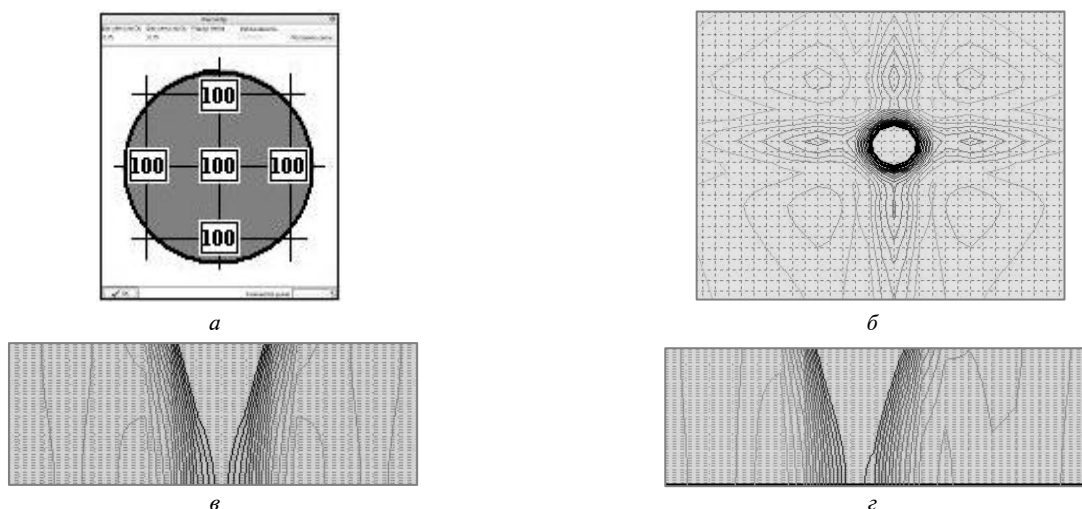


Рис. 9. Рівномірний розподіл потужності лазерного випромінювання в зоні нагрівання (а) і відповідний розподіл температур у площинах XOY (б), YOZ (в) і XOZ (г)

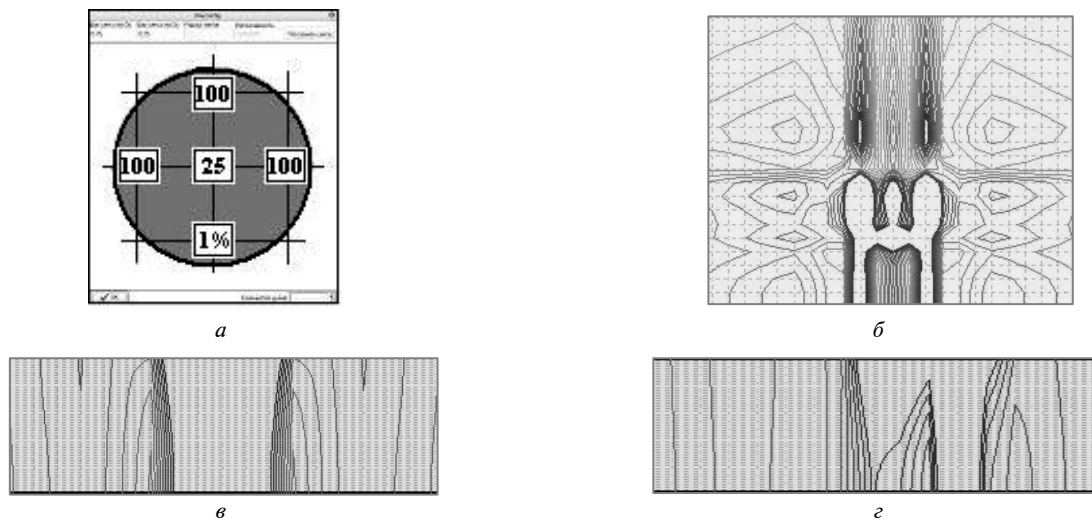


Рис. 10. Нерівномірний розподіл потужності лазерного випромінювання (а) в зоні нагрівання і відповідний розподіл температур у площинах XOY (б), XOZ (в) і YOZ (г)

кроці і ущільнювала вузли в зонах більших градієнтів шуканої функції [8].

Лазерний промінь задавався у вигляді променевого пакета, який складався із складових як рівномірної (рис. 9, а), так і нерівномірної інтенсивності (рис. 10, а).

Як видно з отриманих результатів, при рівномірному розподілі потужності лазерного випромінювання (див. рис. 9) ізотерми шуканої температури, яка забезпечує протікання необхідних структурно-фазових перетворень, обмежують зону, що має нерівномірну ширину по товщині пластини, аналогічно формі зони термічного впливу, показаній на рис. 3. При однакових режимах опромінення (швидкості обробки, діаметрі плями фокусування, потужності випромінювання), але нерівномірному розподілі потужності лазерного випромінювання по зоні нагрівання (100 % інтенсивності випромінювання у фронті і з боків плями фокусування, 25 % у центрі і 1 % у хвостовій частині) (рис. 10, а) ізотерми змінюють свою конфігурацію і обмежують область структурно-фазових перетворень, яка практично має прямокутну форму. Це свідчить про те, що, керуючи розподілом потужності лазерного випромінювання у плямі фокусування і режимами опромінення, можна цілеспрямовано й ефективно змінювати конфігурацію ізотерм температурного поля в тонких пластинках, їх напружено-деформований стан і, як результат, жорсткість виробу.

Запропонований спосіб підвищення жорсткості виробів має досить цікаві перспективи застосування. Наприклад, відомо, що використання відрізних алмазних кругів малої товщини

($\leq 0,5$ мм), як і продуктивність різання кругами більшої товщини, обмежуються недостатньою жорсткістю їх корпусів. За допомогою лазерного способу створення металургійних ребер жорсткості можна значно (мінімум у два рази) підвищити швидкість різання та виготовляти інструменти малої товщини. Результати даної статті можуть бути використані також при розробці і виготовленні кузовів легкових автомобілів, корпусів човнів, кораблів, несучих корпусів різноманітних машин і приладів у машинобудуванні та різних конструкцій у будівництві.

Висновки

Запропоновано новий високоефективний спосіб збільшення жорсткості виробів з різною просторовою конфігурацією, виготовлених із тонколистових матеріалів, створенням металургійних ребер жорсткості, тобто окремих ділянок матеріалу, залишкові напруження в яких мають відповідати максимальним пружним напруженням, що виникають у виробі при зовнішньому навантаженні, за величиною і бути протилежними за знаком.

Характер розташування металургійних ребер жорсткості, їх конфігурацію і розміри (величину та знак потрібних залишкових напружень) можна досить ефективно визначати методами моделювання напружено-деформованого стану виробу в процесі його експлуатації.

Лазерне нагрівання є найефективнішим засобом створення металургійних ребер жорсткості. Воно дає змогу змінювати не тільки величину і знак залишкових напружень на окре-

мих ділянках виробу, а й їх розподіл по товщині. Показано, що для отримання рівномірного їх розподілу по товщині диска і вилучення його деформацій в осьовому напрямку необхідно створити зону нагріву, обмежену визначеними ізотермами, яка б мала однакову ширину по всій товщині диска. Цього можна досягти, використовуючи для нагрівання лазерний пучок з нерівномірним розподілом інтен-

сивності в напрямку переміщення (максимальної – у фронті, мінімальної – у хвості).

Наступним кроком досліджень є встановлення взаємозв'язків між параметрами лазерного опромінювання, хімічним складом і структурою матеріалу, величиною та характером розподілу залишкових напружень, критичними значеннями навантаження та величинами деформацій.

Л.Ф. Головки, М. Рахмани

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ РЕБЕР ЖЕСТКОСТИ, ПОВЫШАЮЩИХ УСТОЙЧИВОСТЬ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Предложен способ увеличения жесткости изделий, изготовленных из тонколистовых материалов, созданием с помощью лазерного облучения металлургических ребер жесткости, т.е. отдельных участков материала конструкции, характер расположения и напряженно-деформированное состояние которых определяются распределением максимальных упругих напряжений, которые возникают в изделии при внешнем нагружении. Показано, что лазерный нагрев является наиболее эффективным способом управления величиной и знаком остаточных напряжений таких локальных участков, конфигурацией и характером расположения. Изменяя распределение интенсивности излучения в плоскости фокусирования, можно обеспечить заданное распределение изотерм по толщине пластины, а значит, и требуемое распределение остаточных напряжений.

L.F. Golovko, M. Rahmani

APPLICATION OF LASER RADIATION FOR THE FORMATION OF METALLURGICAL STIFFENING RIBS AND THE INCREASE OF THIN SHEET PARTS' STIFFNESS

The paper under scrutiny proposes a new way of thin sheet material's rigidity increase. To achieve this, laser radiation is exposed to the formation of additional metallurgical stiffening ribs, which are the parts of the material, in which the location and deformed state are determined by the distribution of elastic stresses, arising due to the applied external load. We show that laser heating is the most efficient way to control and manage the direction and value of residual stresses at these local spots, as well as their configuration and location. By changing the distribution of power density on the focusing plane, it is possible to obtain the desired distribution of isotherms along the sheet's depth, and, consequently, to obtain the given distribution of residual stresses.

1. Доннелл Л.Г. Балки, пластины и оболочки / Пер. с англ. Л.Г. Корнийчука; Под ред. Э.И. Григолюка. — М.: Наука, 1982. — 568 с.
2. Колпаков А.Г., Шеремет И.Г. Задача проектирования слоистых пластин с заданными жесткостями // Прикл. математика и механика. — 2000. — № 3. — С. 504–508.
3. Аннин Б.Д., Каламкаргов А.Л., Колпаков А.Г. Расчет и проектирование композиционных материалов и элементов конструкций. — Новосибирск: ВО "Наука", 1993. — 256 с.
4. Golovko L.F. et al. Lia Handbook of Laser Materials Processing. 7.5.3. — Orlando, USA: Laser Institute of America, 2001. — 715 p.
5. Golovko L., Lukyanenko S., Rahmani Mohsen. Opportunities for Thin Disks Rigidity Management by Means of Laser Heating of Discrete Surface Zones // Laser Technologies in Welding and Materials Processing. — Katsiveli, 2007. — P. 27–32.
6. Головки Л.Ф., Лукьяненко С.А., Рахмани Мохсен и др. Повышение жесткости тонколистовых металлических изделий созданием структурных концентраторов напряжений // Констрування, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий наук.-техн. зб. — Кіровоград: КНТУ, 2008. — Вип. 21. — С. 325–334.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
24 жовтня 2008 року